

同時5軸マシニングセンタによるファン翼の複製とその加工面評価*

和合 健**、飯村 崇**

同時5軸マシニングセンタ(M/C)を使用してファン翼の複製を行った。ファン翼の複製では5軸CAMを用いて同時5軸M/C特有のツールパスを作成し、3軸M/Cでは実現できない加工法が実現できた。さらに、ファン翼の固定で必要になる固定治具を製作する過程で得られた5軸制御ボールエンドミル加工と旋削加工での鋼材(SKH51)加工面の表面粗さを比較して、5軸制御ボールエンドミル加工の有効性を考察した。その結果、5軸制御ボールエンドミル加工では刃先を擦る現象が低減し、工具寿命の延長が期待できる。

キーワード：同時5軸マシニングセンタ、5軸CAM、ファン翼、表面粗さ

Fan-Blade Duplication using Simultaneous Five-Axis Machining Center and Machining-Surface Evaluation

Takeshi Wago and Takashi Imura

We duplicated a fan wing using a simultaneous five-axis machining center. This showed that this processing method applies not only to three-axis machining centers but also to five-axis machining centers with five-axis computer-aided machining, because of the resulting flexible tool path. Based on ball-end-mill processing with five-axis control, we compared the roughness of the machined surface with that obtained by lathe turning. This approach required the fabrication of a fixed jig made of non-hardened steel (SKH51) to hold the fan wing. The results suggested a longer tool life when using ball-end-mill processing with five-axis control because it decreases rubbing between the tool blade and the workpiece surface.

key words : simultaneous five-axis machining center, five-axis computer-aided machining, fan wing, roughness

1 緒言

5軸マシニングセンタ(以下、5軸M/Cという)は、箱物形状ワークピースの場合に底面を除く5面の加工ができることから特に鋳物製造における仕上げ加工で多く利用されてきた。この場合の5軸M/Cは、通常、5面加工機と呼ばれワークピースの姿勢変更が自動で行えることから現在において広く普及している。この5面加工機と呼ばれる5軸M/Cは、言わばワークピースの姿勢変更が自動で機械的に行える3軸M/Cであり、本報で対象とする同時5軸制御M/Cとは大きく異なる。本報で対象とする5軸M/Cは、一斉にX軸、Y軸、Z軸、A軸、C軸の5軸を駆動させて加工が行える同時5軸制御ができる加工装置であり、精度、能率、機能など多くの項目について現状水準を超える高付加価値化が期待できる。

ここでは①ファン翼の複製、②円錐治具加工における加工面の表面粗さ評価の二つに取り組んだ。①ファン翼の複製を行うことで同時5軸M/Cを使用するための工具ツーリング、ワークピースの保持方法、ワーク座標系の定義方法、工具パス生成及び切削シミュレーションによる干渉確認など同時5軸M/C加工で必要となる3軸M/C

とは異なる独特の加工方法の有効性が確認できる。また、②円錐治具加工を対象に同時5軸M/C加工と他の汎用切削加工での加工面粗さを比較評価することで同時5軸M/C加工の有効性が抽出できる。

2 加工装置

表1に同時5軸M/C、表2にCAD/CAMの主な仕様を示す¹⁾。実験に使用した同時5軸M/Cは、立型3軸M/Cのテーブル部にA軸(揺りかご式)とC軸(ロータリテーブル軸)が設置された方式である。この方式は主軸側に首振り機構を与えていないため、加工可能な測定物の大きさは制限されるが剛性が高く高精度加工に有利な構造である。また、実験に使用したCAD/CAMはCADとCAMの連携を強く意識した設計思想を持つ。この連携の利点は、同時5軸M/C加工では干渉問題が非常に大きな比重を占めることから、加工物の他に工具ツーリング、ワークピース保持治具などを総合的なモデリングが必要になり、CAD/CAM連携が強いことが図1に示す切削シミュレーションを利用して工具ホルダとワークピース、治具などの干渉確認に大きな威力を発揮する。

* 平成24年度 基盤的・先導的技術研究開発事業

** ものづくり基盤技術第2部(現 素形材技術部)

表1 同時5軸M/Cの主な仕様

型式	-	HSC 55 Linear (DMG/MORI)
NC装置	-	Heidenhain iTNC 530
駆動ガイド方式	-	リニアガイド・駆動
作業範囲	X軸,mm	450
	Y軸,mm	600
	Z軸,mm	400
旋回軸	A軸,deg	+10/-110
回転軸	C軸,deg	360
最大回転数	min ⁻¹	28000
ツールシャンク	-	HSK-A63

表2 CAD/CAMの主な仕様

CAD部	
型式	TOPsolid Ver6.13J (コダマコーポレーション)
カーネル	Parasolid
モデリング方式	パラメトリック・フィーチャ・ベース3次元モデラ
取り扱い要素	ワイヤフレーム, サーフェース, ソリッド
2次元CAD	2次元ドラフティング
インターフェース	Parasolid, ACIS, STEP, IGES他多数
CAM部	
型式	TOPcam Ver6.13J (コダマコーポレーション)
軸数	2軸, 3軸, 4/5軸
加工方式	等高線, 走査線, 面沿い, ペンシル加工他
ツールパス	加工手順の入れ替えでパス自動生成可
シミュレーション	切削シミュレーション, モディファイ他

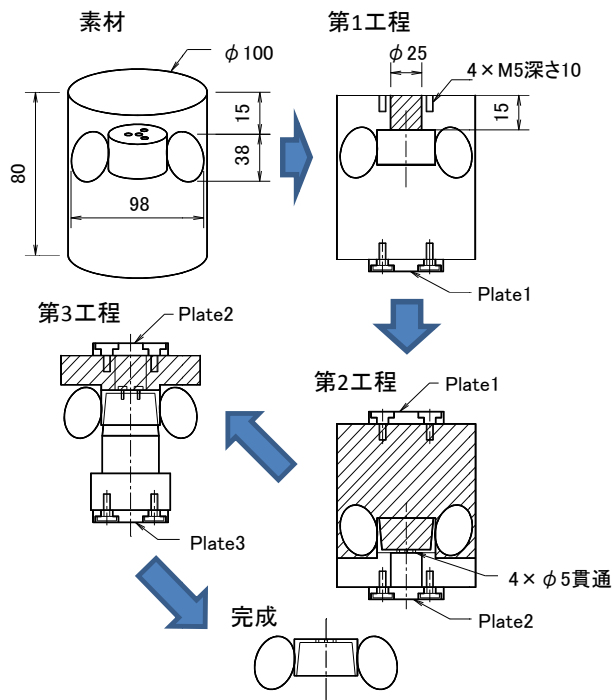
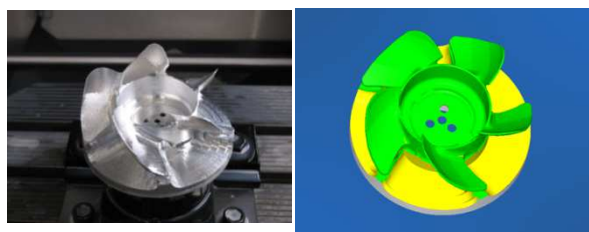


図3 加工工程の説明図 (全3工程)

第1工程 (左: 実加工、右: CAM ベリファイ)



第2工程



第3工程 (上段: 加工開始前、下段: 加工後)

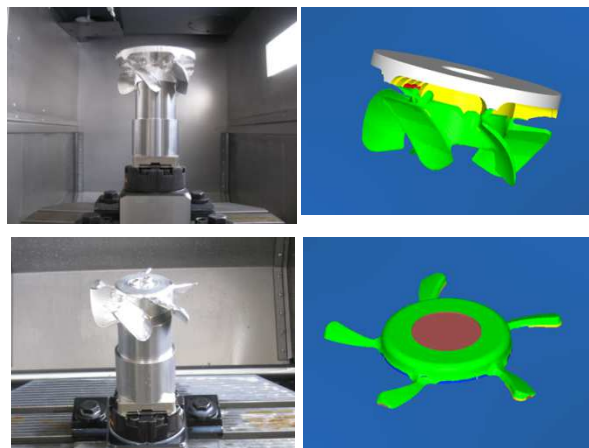


図4 加工工程毎の進捗図

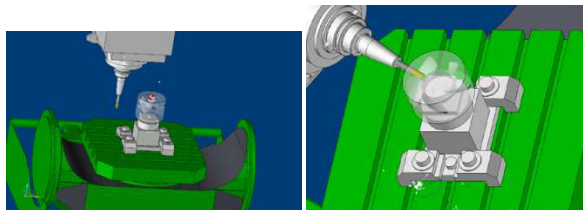


図1 切削シミュレーション (干渉確認)
(左: 3軸加工、右: 4軸加工)



図2 プラスチック製ファン翼
(左: 表側、右: 裏側)

3 ファン翼の複製

3-1 加工工程

図2に原型となるプラスチック製ファン翼の写真、図3に加工工程の説明図、図4に加工工程毎の進捗図を示す。5軸M/C加工の優位性の一つは、ワークピース姿勢変更が容易に行えるため治具からの取り外しを極力少なくできることが挙げられる。最小の取り外し回数を検討した結果、ファン翼を複製するためには上面、側面、底面の全面を加工する必要があり、そのためにはワークピースを一旦取り外して付け替える作業を3回実施する必

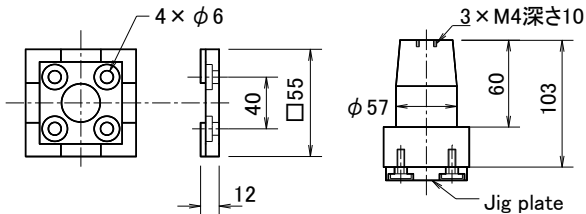


図5 プレート接続治具

図7 円錐治具



第1工程→第2工程 第2工程→第3工程
図6 CMMによるオフライン測定

要があることがわかった。ここで素材はφ100mmで高さ80mmの円柱形状のアルミ材ブロックである。

第1工程は図5に示すプレート接続治具をPlate1の位置にネジ止めし、このプレート治具を利用して、加工機械テーブルに固定したベース治具と接続固定する。第1工程ではφ25mmのポケット円筒を除去加工する2次元ポケット加工とプレート治具をネジ止めするためのM5ネジ穴4個を加工する工程である。この2次元ポケット加工は第3工程でワークピースを円筒治具にネジ止めするためのネジの挿入口として利用され、このポケットの底面はファン翼の上端面となるため最終仕上げ加工が必要となる。

第2工程は一旦Plate1をベース治具から取り外し、Plate2で固定するためPlate1の姿勢をPlate2に引き継ぐことが必要になる。ここでの姿勢引き継ぎ方法は、図6に示すCMMを利用してオフライン測定によりPlate1とPlate2の回転軸及びX、Y軸のゼロ点を50μm程度以内で一致させた。第2工程ではPlate2でベース治具に固定し、ファン翼の下面側を加工し、最後に第3工程で円錐治具にネジ止めするためにファン翼中心円筒部にφ5mmバカ穴を4個穴開けた。

第3工程は、ファン翼表側上端面部の除去加工である。第2工程と同様にCMMのオフライン測定によりPlate2の姿勢をPlate3に引き渡した。ワークピースの固定方法は、図7に示す円錐治具を利用してファン翼の中心部円筒内面の上面と側面を円錐固定治具に密着させ、M4ネジ3本でネジ止めた。

3-2 加工方法

表3に第1工程～第3工程で使用した工具表、表4に加工表を示す。ここでFEMはフラットエンドミル、BEMはボールエンドミル、CDはセンタドリル、DRはドリル、TPはタップである。工具はすべてハイス鋼を使用し、エンドミルの刃数はすべて2枚刃とした。刃数を2枚刃とした理由は、ブロック材からの削り出しが加工の多くを

表3 工具表

第1工程								
工具番号	工具	材質	工具直径 (mm)	刃数 (刃)	全長 (mm)	突出 (mm)	ホルダ長 (mm)	刃長 (mm)
T1	CD	Co-HSS	6	2	122	17	105	6
T2	DR	HSS	4	2	242	55	187	43
T3	TP	HSS	5	2	181	35	146	8
T4	BEM	Co-HSS	6	2	175	55	120	24
T5	FEM	Co-HSS	10	2	169	49	120	45

第2工程								
工具番号	工具	材質	工具直径 (mm)	刃数 (刃)	全長 (mm)	突出 (mm)	ホルダ長 (mm)	刃長 (mm)
T1	FEM	Co-HSS	16	2	172	67	105	67
T2	FEM	Co-HSS	10	2	176	56	120	45
T3	BEM	Co-HSS	8	2	174	54	120	34
T4	CD	Co-HSS	5	2	229	50	179	6
T5	DR	HSS	5	2	242	56	186	50

第3工程								
工具番号	工具	材質	工具直径 (mm)	刃数 (刃)	全長 (mm)	突出 (mm)	ホルダ長 (mm)	刃長 (mm)
T1	FEM	Co-HSS	16	2	172	67	105	67
T2	FEM	Co-HSS	10	2	176	56	120	45
T3	BEM	Co-HSS	8	2	174	54	120	34

表4 加工表

第1工程		
加工工程	工具番号	切削方式
ポケット荒取	T5(FEM)	側面切削 (スパイラル)
荒取(等高線)	T4(BEM)	曲面切削
3D仕上(等高線)	T4(BEM)	曲面切削
センタ穴	T1(CD)	ドリリング
ドリル穴	T2(DR)	ドリリング
ネジ切り	T3(TP)	タッピング

第2工程		
加工工程	工具番号	切削方式
3軸荒取(上面除去)	T1(FEM)	側面切削
4軸荒取(外周面)	T1(FEM)	溝切削
4軸荒取(外周面)	T2(FEM)	溝切削
4軸面扱い(羽表)	T3(BEM)	曲面切削
4軸面扱い(羽裏)	T3(BEM)	曲面切削
3D輪郭(羽先)	T3(BEM)	曲面切削
3軸荒取(円筒内部)	T2(FEM)	溝切削
面削り(円筒ネジ座部)	T2(FEM)	正面切削
3軸仕上(等高線)	T3(BEM)	曲面切削
面扱い(円筒側面)	T3(BEM)	曲面切削
センタ穴	T4(CD)	ドリリング
ドリル穴	T5(DR)	ドリリング

第3工程		
加工工程	工具番号	切削方式
3軸荒取(Z0.5~Z-13)	T1(FEM)	側面切削
3軸再荒取(Z-12~Z-23)	T1(FEM)	溝切削
3軸荒取(Z0.3~Z-23)	T2(FEM)	溝切削
等高線仕上(羽部, Z-12~Z-23)	T3(BEM)	曲面切削
3軸面沿(円筒上面部)	T3(BEM)	曲面切削

占めていたことから底刃を利用したポケット加工時に切り屑の排出性を考慮した。また、ワークピース材がアルミであることから工具の芯厚(剛性)よりも鋭利で薄い切れ刃(切削性)を重視したエンドミル刃数の選択が適



図8 4軸加工
(左: 4軸荒取り、右: 4軸面扱い)

正であると考えた。表2の加工表ではエンドミル加工のすべてで切削速度は60m/min、一刃送りは0.1mm/刃とした。加工表では第1工程と第3工程はすべて3軸以下の軸駆動による加工であり、第2工程で4軸加工を多用する配置とした。これはCAMによる加工表作成の過程で同時5軸M/Cによる今回の加工の場合では、底面を除く5面の加工が第2工程に集約出来たためであり、つまり底面の加工が不要の場合はワークピースの着脱は不要で単工程のみのワンチャックで全加工が完遂できることがわかった。先の説明のとおり第2工程では図8に示す4軸加工を多用しており、実際に4軸加工を体験した感触から、ワークピース形状が円筒形状でその側面部を加工する場合にはA軸を90°傾けた姿勢でC軸を回転しながらX、Y、Z軸を駆動して加工を行う4軸加工は能率及び面品位の観点から高精度かつ高効率に適した加工法であるようだ。

4 固定治具の加工面の表面粗さ評価

4-1 目的

同時5軸M/C加工はワークピースの姿勢変更が行えるため円錐形状の側面部の加工時に工具の突出し長さが短くできる利点がある。またエンドミル加工においてA軸を任意角度に傾斜させ、C軸回転とX、Y、Z軸駆動を同時に行って加工する加工方法²⁾は、エンドミル加工でありながら旋削加工に似た疑似連続切削による高品位面の達成が期待できる。ここでは、ミーリングによるC軸回転5軸仕上げ加工と旋削加工を同一ワークピースで行い、両者の加工面の表面粗さを比較した。

4-2 実験方法

同時5軸M/CとNC旋盤(型式:SL-153MC、メーカー:森精機)の異なる加工法の2台の加工機を使用して円筒加工をした。旋削加工は、NC旋盤でワークピース半径方向軸(X軸)を固定してワークピース円筒軸方向(Z軸)のみに切削送りを与える加工方法で旋削加工をした。両者の加工条件を表5に示す。使用したチップは超硬+TiCVDコーティング材の菱形チップで先端Rは0.4mmである。C軸回転5軸仕上げ加工は、図9のとおりA軸を傾けてC軸回転とX、Y、Z軸の5軸を同時に軸駆動させる加工法である。使用した工具は超硬+(Ti,Al)Nコーティング材のR3ボールエンドミルである。

両者の加工位置は図10のとおり同一円筒ワークピースを使用して最初に旋削加工を行い、次に円筒上部位置

表5 加工条件

項目	C軸回転5軸仕上げ加工 (ボールエンドミル加工)	旋削
切削速度 m/min	19.9	100
送り量	0.18(mm/tooth)	0.15(mm/rev)
Radius depth mm	0.344	1.0
Axis depth mm	Auto	-
突出し長さ mm	26	50
刃物形状	ボールエンドミル	菱形チップ
刃数 tooth	2	-
先端R mm	R3	R0.4
刃物材質	超硬+(Ti,Al)Nコート	超硬+Ti_CVDコート
刃物メーカー	三菱マテリアル	京セラ
刃物型式	VC-2MB	DNMG150404GU
突出し長さ mm	26	68
加工物材質	SKH51生材	

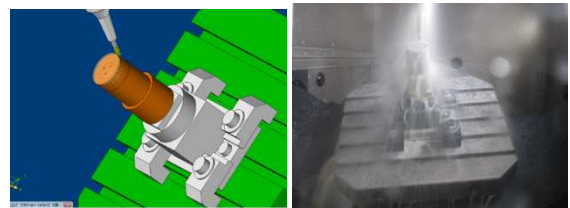


図9 C軸回転5軸仕上げ加工

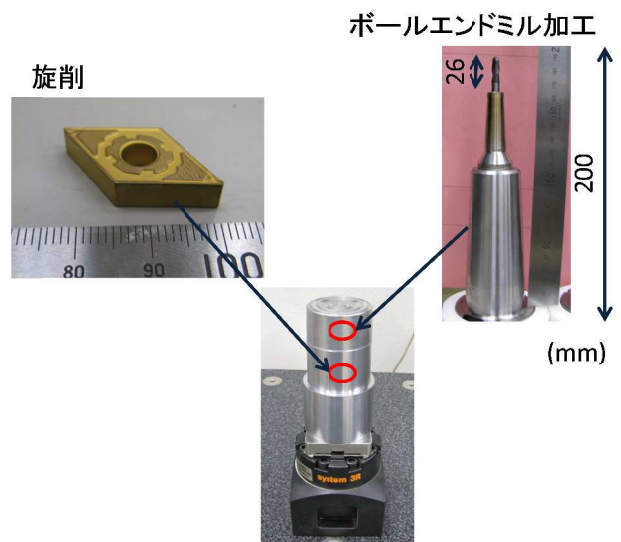


図10 両者の加工位置

のみにC軸回転5軸仕上げ加工により円錐形状に加工した。ここでボールエンドミルをツーリングしたホルダは2ピース型の焼きばめ式を使用し、ホルダと加工機テーブルとの干渉を避けるためにホルダと工具を併せた全長を200mmと大きく取り、一方でエンドミルの撓みを低減させて加工精度を高めるためにエンドミルの突出し長さを26mmと短く設定した。

4-3 実験結果及び考察

図11に加工面の観察、図12に表面粗さの比較、図13に断面曲線の比較、図14にワークピース上面の表面粗さを示す。加工面の観察では、旋削加工は筋状の凹凸が見られ所謂、引物と呼ばれる加工面であることが分かる。対してボールエンドミルによるC軸回転5軸仕上げ加工は連続した鱗状の加工跡が見られ、これは通常のボール

エンドミルを使用した加工跡と同じ軌跡であることがわかる。このことからC軸回転を与えた5軸加工においてもエンドミル加工の鱗状の工具軌跡が踏襲されることが分かった。

図12に示した表面粗さではボールエンドミル加工がRa0.79 μm に対し旋削加工がRa2.44 μm であった。Rzではボールエンドミル加工が4.19 μm に対し旋削加工が10.08 μm であった。これはボールエンドミル加工は切れ刃による切削と同時に切れ刃の裏面でする動作が交互に繰り返される加工原理であるためこする動作により加工面を押し潰す動作が行われたために表面粗さが旋削に比べて小さくなったと予想される。一方、旋削加工は連続的にチップの切れ刃で削る加工法であるため規則的に鋭利な加工軌跡であることがわかる。

図13に示した断面曲線は粗さ曲線がフィルターをかけて高周波成分のみを抽出した波形形状であるのに対し、断面曲線は切削面を単に輪切りにして横方向から覗いた脚色していない断面形状である。ボールエンドミルによるC軸回転5軸仕上げ加工は、2枚刃による断続切削の影響から不規則な凹凸形状になっている。一方、旋削加工の断面曲線は粗さ曲線と類似した規則的な凹凸形状が見られる。両者をそれぞれの理論粗さと比較するとボー

切削方式	最大差Z	理論粗さ
ボールエンドミル: R3mm	12.4	9.9
旋削: コーナR0.4mm	14.0	7.0

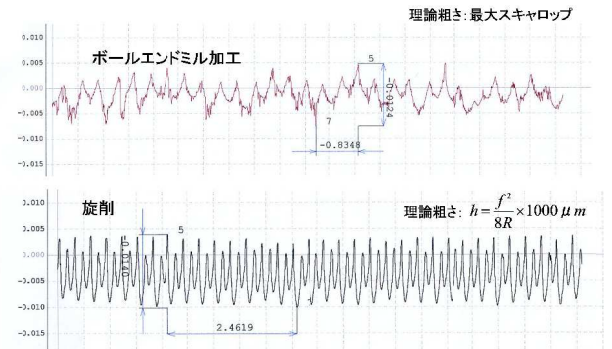


図13 断面曲線での比較

切削方式	Ra	Rz	Rt	理論粗さ
ボールエンドミル: R3mm	0.40	1.94	3.79	9.9

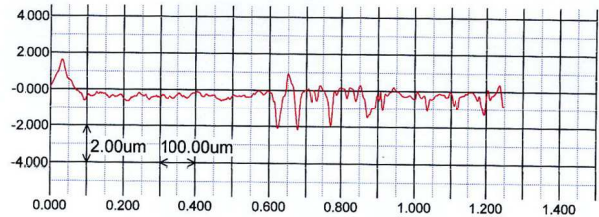
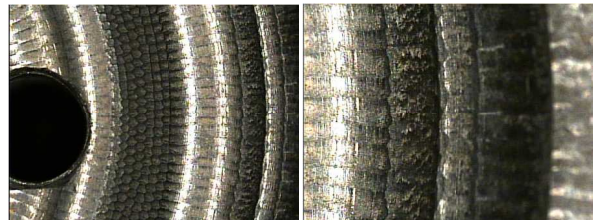


図14 ワークピース上面の表面粗さ

ルエンドミルC軸回転5軸加工では最大差Zが理論粗さよりも2.5 μm 大きく、旋削加工では最大差Zが理論粗さよりも7.0 μm 大きい結果となった。ここで、ボールエンドミルC軸回転5軸加工の理論粗さはCAMが計算して示した最大スキヤロップを使用し、旋削加工では図中に示した式により算出した。その結果、旋削加工で最大差Zと理論粗さで倍の差が生じているが、切削加工領域における最大差7 μm の数値は工具摩耗の進行で容易に生じる大きさであるため、ここでの結果では理論粗さとはほぼ一致したと言える。

図14にワークピース上端面のボールエンドミル3軸仕上げ加工による表面粗さを示す。図1のボールエンドミルC軸回転5軸仕上げ加工の表面粗さと比較するとRaで3軸仕上げ加工の方がほぼ半分の数値になっている。Rz、Rtも同様に3軸仕上げ加工の方が数値が小さい。これは3軸加工ではまさに典型的なボールエンドミルの先端点による切削速度0かつ、擦る加工が行われている証明であると考えられる。対して5軸加工では切削速度0の切削点を避けた切れ刃による良好な切削が行われた効果からこする加工が低減されたために、表面粗さが大き

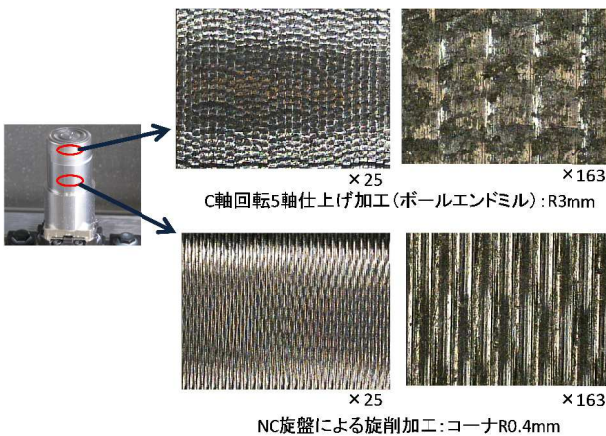


図11 加工面の観察

切削方式	Ra	Rz	Rt	理論粗さ
ボールエンドミル: R3mm	0.79	4.19	6.34	9.9
旋削: コーナR0.4mm	2.44	10.08	10.92	7.0

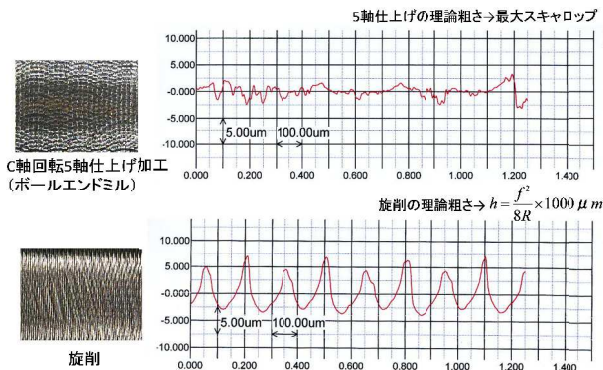


図12 表面粗さでの比較

くなったと考えられる。このことから3軸駆動によるボールエンドミル加工に対して5軸制御によるボールエンドミル加工は切れ刃が適正に切削し、こする現象を低減したために表面粗さが小さくなったとする仮定が正しければ、5軸制御によるボールエンドミル加工は工具摩耗を低減させ工具寿命を延ばす方策に成り得る。

5 結 言

同時5軸マシニングセンタと5軸CAMを利用してファン翼の複製に取り組んだ。その中でファン翼加工を実施するために必要となる5軸CAMによるツールパス作成及び固定治具製作を通して同時5軸M/C加工を適正に行うための知見が得られたので以下に示す。

- 1) ファン翼の複製に取り組む5軸CAMによるツールパスを作成し、3軸M/Cでは実現できない同時5軸M/Cにより一斉に5軸を駆動し、工具姿勢を意図した向きに傾けることができる特殊な加工方法によりファン翼が複製出来た。
- 2) ファン翼の複製では底面を含めた全面加工をするためには最終工程で固定治具の活用は必須であり、最小工程数で3つの工程が必要であった。つまり、ファン翼の底面を含めた全面加工を行うためには3回の取り外し後の取付けが必要になる。

- 3) 固定治具を製作する過程で同時5軸M/Cで特徴的な加工法であるボールエンドミルによるC軸回転5軸仕上げ加工法と旋削加工で得られた加工面の表面粗さを比較した。その結果、ボールエンドミルによるC軸回転5軸仕上げ加工法はC軸回転を与えてもボールエンドミルによりワークピース表面を掘り起こす切削現象が変わらないため、通常の3軸M/Cによるボールエンドミル加工で見られる鱗状の切削跡は踏襲される。
- 4) ボールエンドミルによるC軸回転5軸仕上げ加工による加工面の表面粗さと、同一のボールエンドミルを使用した3軸加工による加工面の表面粗さと比較した結果、C軸回転5軸仕上げ加工による加工面で表面粗さが大きくなった。これは切れ刃により擦る現象が低減し、適正な切削原理である切れ刃による削る切削が行われていたことが理由であると仮定すれば、C軸回転5軸仕上げ加工法は工具摩耗の低減に寄与し、工具寿命の延長に繋がることを期待できる。

文 献

- 1) DMG/森精機：HSC 55 Linear カタログ (2012)
- 2) コダマコーポレーション：TopCAM v6.12J
4/5軸トレーニングガイド